


Comportamento tribológico dos materiais SAE 1045 x DIN GG20 em contato côncavo-convexo presentes em máquinas ferramenta


Nikolas Andrei Furlan Canabarro ¹ 


Victor Velho de Castro ^{1*} 

Felipe Ariel Furlan Canabarro ¹ 

Evandro Benincá ¹ 

Bruno Bueno ² 

Fabiana Lopes da Silva ² 

Célia de Fraga Malfatti ¹ 

Resumo

A resposta ao desgaste dos materiais é amplamente influenciada pela natureza específica de seus microconstituintes e pela predominância de um conjunto de parâmetros interconectados ao sistema em que é empregado. Para caracterizar o comportamento tribológico do aço SAE 1045 e do Ferro Fundido DIN GG20, foram realizados testes de desgaste à seco em um tribômetro na configuração bucha-pino, único existente no Brasil, o qual foi desenvolvido para analisar superfícies em contato similares à contraponto (contato côncavo-convexo) de máquinas ferramenta. As características de desgaste foram então determinadas com base em múltiplos fatores, como dureza, microestrutura, rugosidade, aparência das superfícies desgastadas, perda de massa decorrente do processo de desgaste, e coeficiente de desgaste. As diferenças microestruturais e de dureza levaram a uma menor perda de massa no pino, fabricado em aço SAE 1045 em comparação à bucha, fabricada em ferro fundido DIN GG20. Após a realização dos ensaios foram encontrados indicativos da ocorrência dos mecanismos de adesão, fadiga superficial e em especial de abrasão, o que levou ao polimento das superfícies das amostras do pino e da bucha.

Palavras-chave: Tribologia; Contato côncavo-convexo; Máquinas e equipamentos; Aços; Ferro fundido.

Tribological behavior of SAE 1045 x DIN GG20 materials in concave-convex contact in machine tools

Abstract

The wear response of materials is largely influenced by the specific nature of their microconstituents and the predominance of interconnected parameters within the system in which they are employed. To characterize the tribological behavior of the material pair steel SAE 1045 and cast-iron DIN GG20, dry wear tests were conducted using a pin-on-bushing tribometer, the only one of its kind in Brazil, which was developed to analyze contact surfaces similar to the tailstock (concave-convex contact) found in machine tools. The wear characteristics were then determined based on multiple factors, such as hardness, microstructure, roughness, appearance of worn surfaces, mass loss due to the wear process, and the wear coefficient. Microstructural and hardness differences resulted in lower mass loss in the pin and higher mass loss in the bushing compared to other tested pairs. Greater wear was observed in DIN GG20 bushings than in SAE 1045 pins. After the tests, evidence of adhesion, surface fatigue, and especially abrasion mechanisms were found, which led to polishing the sample surfaces of both the pin and the bushing.

Keywords: Tribology; Concave-convex contact; Machinery and equipment; Steels; Cast iron.

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

²Instituto Federal Rio Grande do Sul – IFRS, Caxias do Sul, RS, Brasil.

*Autor correspondente: victor.castro@ufrgs.br



1 Introdução

No uso de elementos de fixação para usinagem, uma das principais causas de falha é o desgaste prematuro nos pontos de contato entre o objeto a ser fixado e o fixador. Quando superfícies estão em contato, o desgaste é inevitável, sendo uma função da continuidade das condições envolvidas e do tempo de operação [1]. Contatos do tipo côncavo/convexo são comuns em diversos componentes, como no contato entre um elemento de ferro fundido cinzento – DIN GG20 e um contraponto de aço SAE 1045, representando um exemplo típico desse sistema tribológico.

Sabe-se que uma peça pode falhar de três maneiras principais: obsolescência, ruptura ou desgaste [2]. O desgaste, por definição, é o dano progressivo a uma superfície sólida, caracterizado pela perda de material em função do movimento relativo entre as superfícies em contato [3]. Estima-se que cerca de 23% do consumo energético total esteja relacionado a contatos tribológicos, sendo 20% atribuídos ao atrito e 3% à manutenção e substituição de peças desgastadas [4].

Nesse contexto, o objetivo deste estudo é avaliar o comportamento tribológico de dois materiais comumente utilizados na fabricação de elementos de fixação: o aço SAE 1045 e o ferro fundido DIN GG20. Os ensaios foram realizados em um tribômetro do tipo bucha-pino, único no Brasil, desenvolvido por pesquisadores do Instituto Federal de Ciência, Tecnologia e Educação do Rio Grande do Sul (IFRS), campus Caxias do Sul. O equipamento foi projetado para simular contatos côncavo-convexo, encontrados em diversas aplicações industriais, como nos contrapontos de máquinas-ferramenta [5].

Foi determinado o coeficiente de atrito entre as amostras, sendo o pino fabricado em aço SAE 1045 e a bucha confeccionada em DIN GG20. O desgaste foi avaliado por meio da medição da variação de massa das amostras, e, a partir desses dados, calculou-se o coeficiente de desgaste.

2 Materiais e métodos

Para este estudo, foram selecionados dois materiais tradicionalmente utilizados na fabricação de contra corpos: o aço SAE 1045 e o ferro fundido DIN GG20, aplicados como modelos de corpo de prova pino e bucha, respectivamente. As amostras de SAE 1045 (pino) passaram por processos de torneamento, tratamento térmico e posterior retificação da superfície. Já as amostras de DIN GG20 (buchas) foram apenas torneadas. Esse conjunto pino-bucha simula condições reais de operação encontradas em aplicações industriais, como os contrapontos de máquinas-ferramenta.

Antes do início dos ensaios de desgaste, as amostras foram submetidas a um banho ultrassônico por 15 minutos em água deionizada a uma temperatura controlada de 30 °C. Posteriormente, foram limpas com álcool isopropílico e secas com ar forçado. As dimensões das buchas e dos pinos estão apresentadas na Figura 1A e 1B, respectivamente. Os materiais usados na confecção do pino e da bucha seguem

as composições químicas estabelecidas pelas normas NBR NM 87:2000 para aços e DIN EN 1561 para ferro fundido.

Para simular condições reais de operação, as amostras de pino foram submetidas a têmpera em água, com temperatura de austenitização superior a 880 °C e permanência de 30 min para homogeneização térmica, seguida de martêmpera a 160 °C por 15 min. Esse tratamento térmico foi realizado por uma empresa especializada.

A rugosidade das amostras foi medida com um rugosímetro DIGIMESS TR200, sendo avaliadas as rugosidades médias Ra e Rz em diferentes posições.

No pino, as medições foram realizadas nas posições de 0°, 135° e 270° em relação à força normal aplicada; na bucha, as medições ocorreram nas posições de 0°, 90°, 180° e 360°.

A dureza foi medida utilizando um durômetro INSIZE ISH-DR150, conforme a norma ABNT NBR 6508:1.

Foram realizadas cinco medições de dureza em cada amostra, calculando-se o valor médio. As medições de dureza foram feitas utilizando um penetrador de diamante piramidal, com carga de 150 kgf para a escala Rockwell C, e um penetrador esférico de 1/16" com 100 kgf para a escala Rockwell B. A dureza Vickers foi obtida com uma tabela de conversão de durezas.

Ensaio metalográficos foram realizados para verificar a microestrutura dos materiais utilizados. O corte, embutimento e ataque químico foram executados de acordo com as especificações das normas NBR 13284 e NBR 8108. Seções transversais do pino e da bucha foram embutidas em resina fenólica, lixadas com granulometrias variando entre 80 e 2000 micras, e polidas com pasta de diamante de 3 µm. O ataque químico foi feito com Nital à 2%. Após o ataque, as amostras foram analisadas em um microscópio Olympus BX41M-LED.

2.1 Ensaios tribológicos

O tribômetro utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido no Campus Caxias do Sul do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS [6]. O equipamento foi projetado especificamente para estudar o desgaste entre superfícies em contato do tipo côncavo-convexo, reproduzindo a interação entre dois cilindros concêntricos, configuração comumente encontrada em sistemas de pinos e buchas. O projeto do tribômetro está protegido pelo depósito de patente BR 10 2019 006518 4 A2 [5]. Por ser um equipamento inovador e único, ainda não existem normas técnicas específicas para a realização desse tipo de ensaio. Os parâmetros do inversor de frequência e do motor utilizados durante os ensaios de desgaste estão detalhados na Tabela 1.

Foi aplicada uma carga de operação de 5 kg. O ensaio de desgaste foi conduzido com o pino girando continuamente em seu próprio eixo, em rotação de 360° sempre no mesmo sentido. A coleta de dados ocorreu a cada 30 mil ciclos, com medições da massa, dimensões e rugosidade dos pares pino-bucha.

Ao final do ensaio, as amostras completaram 210 mil ciclos de operação.

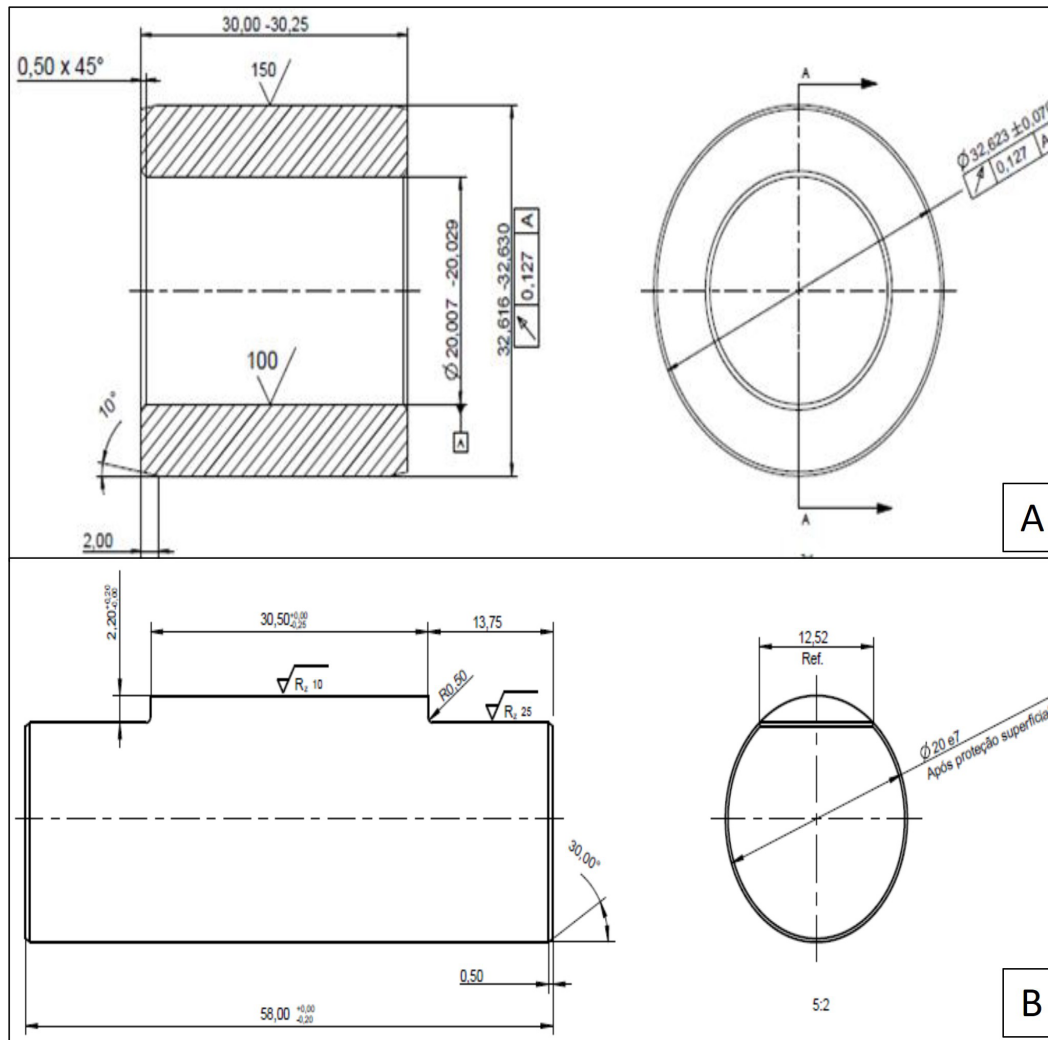


Figura 1. Representação das amostras utilizadas nesse estudo. (A) Bucha de ferro fundido GG20; (B) Pino de aço SAE 1045.

Tabela 1. Parâmetros do inversor de frequência e acionamento do motor

Parâmetro	Frequência do inversor (Hz)	Boost de Torque (%)	Tempo de aceleração (s)	Tempo de desaceleração (s)
Valores	9,0	30	0,5	0,3

Para a medição da massa, utilizou-se uma balança analítica EDUTECH STR 224, com resolução de 0,0001 g e repetibilidade inferior a 0,1 mg. As massas foram registradas em todos os intervalos de ciclos, com cinco medições realizadas em cada intervalo.

A medição do coeficiente de atrito foi realizada em um procedimento distinto, onde a amostra foi rotacionada 90° para a esquerda em relação ao ponto central, seguida de um retorno de 90° no sentido oposto, resultando em um deslocamento total de 180°.

O coeficiente de atrito foi calculado pelas Equações 1 e 2 [7,8].

$$r \sin \varphi_c = r_f \quad (1)$$

$$M \approx R r \varphi_c \quad (2)$$

onde: φ_c é o ângulo de atrito; r_f é o círculo de atrito; R é a reação da força normal; M é o valor do torque medido.

A determinação do coeficiente de desgaste seguiu o modelo proposto por Archard (Equação 3), que estabelece que o volume total desgastado é proporcional à área real de contato multiplicada pela distância de deslizamento [8].

$$V = K A_r l = K l \frac{W}{H} \quad (3)$$

onde: V é o volume desgastado [m³]; K é o coeficiente de desgaste [-]; A_r é a área real de contato [m²]; W é carregamento [N]; H é a dureza [Pa]; l é distância de deslizamento [m].

3 Resultados e discussões

3.1 Caracterizações

Nas fases formadas no aço SAE 1045 tratado termicamente (Figura 2A e 2B), foi detectada a presença de ferrita proeutetóide com diferentes morfologias, nucleadas nos contornos de grão. Embora a martêmpera seja um tratamento viável para o SAE 1045, mesmo que a transformação completa da austenita em martensita não ocorra à temperatura ambiente, a temperabilidade do material pode ter influenciado a presença de outras microestruturas. As amostras de aço SAE 1045 apresentaram dureza média de aproximadamente 392 HV (Tabela 2).

Em relação ao ferro fundido (Figura 2C e 2D), a norma AFS-ASTM [9] caracteriza a grafita observada como

tipo A, com veios curvos de orientação aleatória e bifurcada. A microestrutura é similar à descrita em outros estudos, como o de Avcı et al. [10]. A dureza dessas amostras foi de aproximadamente 228 HV (Tabela 2). Assim como em outros materiais, no ferro fundido DIN GG20 a microestrutura desempenha um papel crucial no desempenho em relação ao desgaste. A estrutura lamelar perlítica e a quantidade de flocos de grafita influenciam diretamente as propriedades mecânicas do material, sendo que uma maior presença dessa fase resulta em maior resistência ao desgaste. Outros estudos [11] indicaram que flocos de grafita com morfologia mais refinada, junto a uma matriz perlítica também refinada, aumentam a resistência ao desgaste em ferros fundidos cinzentos. Polat et al. [12] analisaram a resistência ao desgaste dos ferros fundidos GG20 e GG25, observando

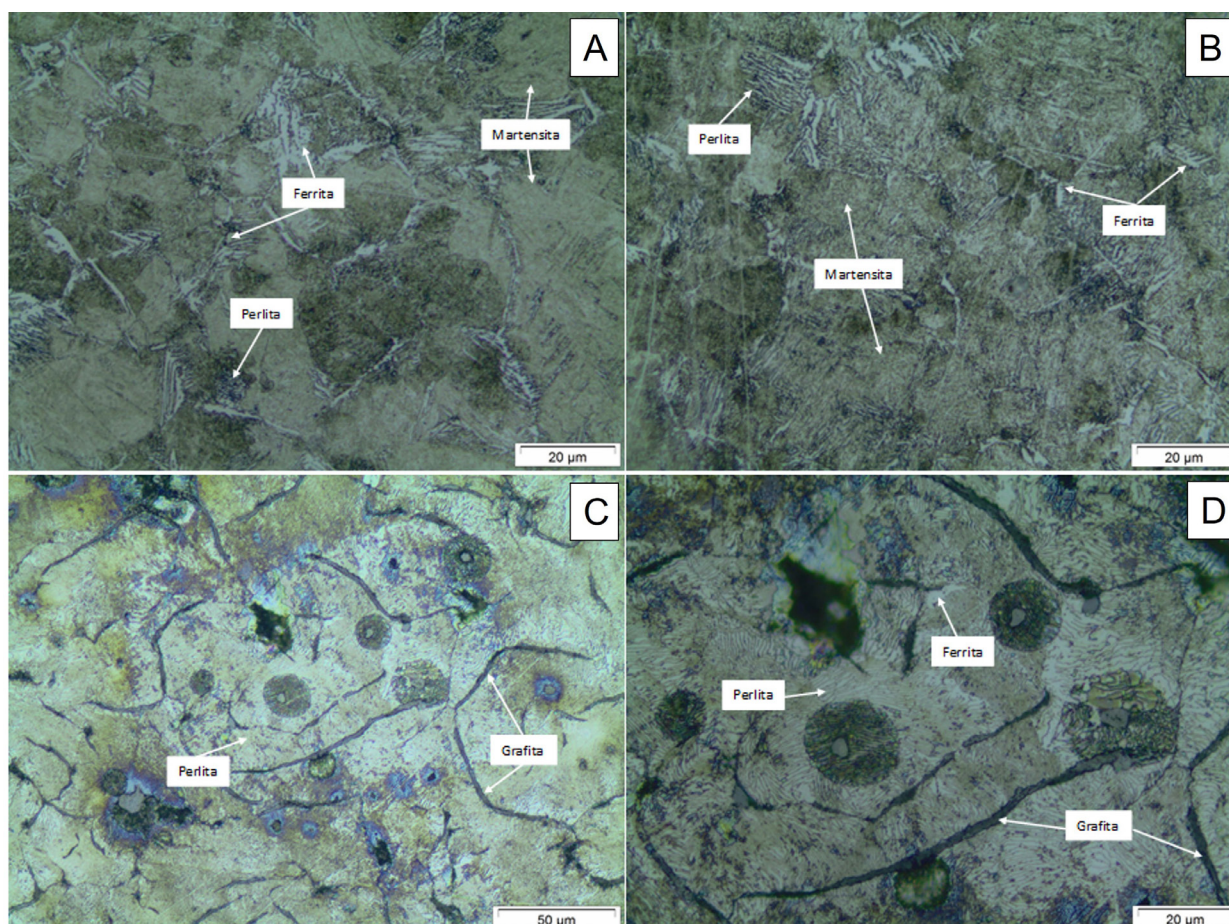


Figura 2. Análise micrográfica – imagens obtidas por microscopia óptica das amostras utilizadas nesse estudo. (A) e (B) Aço SAE 1045; (C) e (D) Ferro fundido GG20. Ataque: Nital.

Tabela 2. Durezas dos substratos metálicos utilizados nesse estudo

Amostra	Dureza (HV)	Rugosidade -Ra (μm)	Rugosidade -Rz (μm)
SAE 1045 Tratado Termicamente	392 ± 153	$0,40 \pm 0,04$	$2,80 \pm 0,40$
DIN GG20	228 ± 50	$1,55 \pm 0,4$	$8,70 \pm 2,0$

uma maior presença de grafita em flocos no GG20, o que foi correlacionado a uma maior dureza e menor coeficiente de atrito para esse material. No entanto, apesar de sua maior dureza, o GG20 apresentou maior volume de desgaste, comportamento atribuído à tendência de ruptura dos flocos de grafita sob carga, devido à maior concentração de carbono.

O processo de retificação superficial realizado nas amostras de pinos (SAE 1045) resultou em valores de rugosidade Ra de aproximadamente $0,4 \mu\text{m}$ e Rz de $2,8 \mu\text{m}$. Como as buchas (DIN GG20) não passaram por retificação após o torneamento, seus valores de rugosidade superficial foram de aproximadamente Ra $1,55 \mu\text{m}$ e Rz $8,70 \mu\text{m}$.

3.2 Ensaios tribológicos

Em todos os ensaios, o pino de SAE 1045 apresentou menor perda de massa em comparação à bucha de DIN GG20. As perdas de massa para cada amostra estão apresentadas na Tabela 3. Sabe-se que fatores como a topografia superficial ou mesmo a ocorrência de desgaste adesivo devido a compatibilidade metalúrgica existente entre os materiais do par tribológico podem ter contribuído para o maior desgaste da bucha de DIN GG20. No entanto, possivelmente esse comportamento pode ser explicado pela significativa diferença de dureza entre os materiais, sendo os pinos de aço carbono dotados de uma matriz microestrutural martensítica mais dura, enquanto as buchas de ferro fundido cinzento apresentam uma matriz perlítica, conforme discutido anteriormente.

Além disso, a maior perda de massa das buchas e sua rugosidade superficial mais elevada, resultante do processo

de fabricação (Tabela 3), contribuíram para a diminuição da rugosidade superficial ao longo do ensaio.

Isso ocorreu pela quebra dos picos mais pronunciados, especialmente na rugosidade Rz, conforme observado com o aumento da distância percorrida (Figura 2).

Vale ressaltar que esse fenômeno de redução da rugosidade também foi observado nas amostras de SAE 1045 temperado e revenido (pino).

Os coeficientes de desgaste k , conforme descrito por Archard, estão apresentados na Figura 3. O menor coeficiente foi observado nas amostras de pino, com uma média de aproximadamente $6,30 \times 10^{-6}$, enquanto nas amostras da bucha, a média do coeficiente de desgaste ficou em aproximadamente $17,1 \times 10^{-6}$. Esse comportamento segue a mesma tendência observada na perda de massa e pode ser atribuído à significativa diferença de dureza entre os materiais das amostras.

Além disso, a variação microestrutural entre o aço SAE 1045 temperado e revenido e o ferro fundido GG20 também pode ter influenciado as diferenças detectadas nos coeficientes de desgaste. A dispersão dos resultados do coeficiente k pode estar relacionada à heterogeneidade microestrutural entre as amostras, já mencionada. Castro et al. [13] apontam que as variações nas composições microestruturais do SAE 1045, decorrentes de diferentes temperaturas de revenimento, podem impactar significativamente o coeficiente de desgaste.

Como mencionado anteriormente, o coeficiente de atrito foi determinado em um modo de operação distinto daquele usado para a medição do volume desgastado, sendo aferido após diferentes números de ciclos. Os ensaios foram conduzidos em sequência, utilizando os mesmos corpos de

Tabela 3. Perda de massa nas amostras

Amostra	Material	Média (g)	Desvio Padrão (g)	Coefficiente de desgaste
Pino	SAE 1045	26,05	1,17	$6,30 \times 10^{-6}$
Bucha	DIN GG20	106,96	4,15	$17,1 \times 10^{-6}$

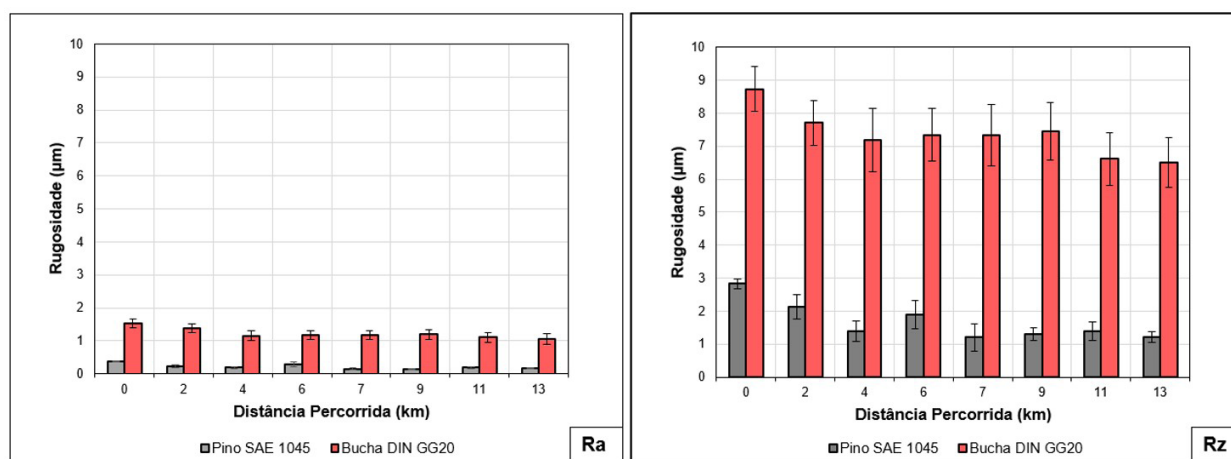


Figura 3. Rugosidade superficial das amostras após diferentes distâncias percorridas no ensaio tribológico.

prova, com limpeza entre os três levantamentos do coeficiente de atrito. Os resultados estão apresentados na Figura 4.

De forma geral, observa-se um primeiro estágio (*running-in*), onde há variações no coeficiente de atrito, indicando que as superfícies ainda não atingiram um estado estável. Nesse estágio inicial, as asperezas das superfícies de ambos os materiais são submetidas a esforços que causam deformações ou quebras nos picos e vales, resultando em flutuações no coeficiente de atrito até que ele se estabilize. Zambrano et al. [14] correlacionaram o endurecimento por encruamento no estágio de *running-in* com o início de um comportamento mais estável [15].

No ensaio “inicial”, a dinâmica de flutuação do coeficiente de atrito foi menos acentuada. Isso pode ser atribuído à maior homogeneidade das superfícies em contato antes do início do ensaio, já que as modificações nas condições superficiais das amostras ainda eram mínimas.

Essas flutuações estão associadas ao desgaste, quebra de óxidos e remoção de detritos [16].

Após 100 ciclos de operação, embora o coeficiente de atrito inicialmente estivesse em torno de 0,25, houve um aumento para cerca de 0,5, indicando uma maior resistência

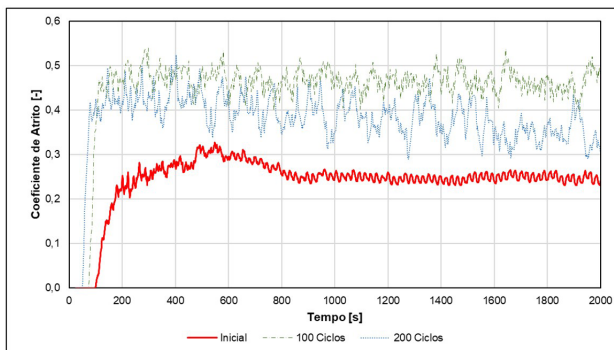


Figura 4. Coeficiente de atrito.

ao deslizamento entre as superfícies em contato. A partir desse ponto, o coeficiente de atrito permaneceu relativamente constante ao longo do ensaio. No terceiro levantamento, após 200 ciclos, o coeficiente inicialmente se manteve próximo ao valor anterior, mas apresentou uma tendência de queda, retornando a valores semelhantes ao ensaio inicial. No entanto, as flutuações observadas neste terceiro caso foram as mais intensas registradas durante todo o ensaio. Esses comportamentos refletem as condições das superfícies, uma vez que o desgaste gerado ao longo dos ensaios alterou a resistência ao deslizamento e, conseqüentemente, o coeficiente de atrito.

Ghasemi e Elmquist [17] estudaram a formação de tribofilmes em superfícies de desgaste, especialmente em ferros fundidos. No decorrer do desgaste, partículas de grafite são fraturadas e removidas das lamelas, atuando como lubrificantes sólidos. A mudança no coeficiente de atrito, apresentada na Figura 3, que eleva os valores após os primeiros ciclos, pode estar associada à remoção desse filme autolubrificante nos intervalos entre as medições. As partículas de grafite desgastadas das buchas provavelmente contribuíram para o aumento da lubrificidade do sistema tribológico durante o ensaio.

Observou-se uma taxa de desgaste na ordem de 10^{-6} , típica de sistemas lubrificados. Esse comportamento foi favorecido pela característica autolubrificante dos ferros fundidos, devido à formação de tribofilmes de grafite [17], resultando em um sistema tribológico semelhante à lubrificação em regime limite.

3.3 Mecanismos de desgaste

Diversos estudos indicam um aumento na predominância do mecanismo de abrasão em função da distância percorrida ou do tempo de operação no SAE 1045 [18]. Esse processo resulta em superfícies mais lisas, decorrentes da deformação plástica, e apresenta um desgaste relativamente baixo, embora introduza tensões superficiais [19]. A Figura 5 apresenta

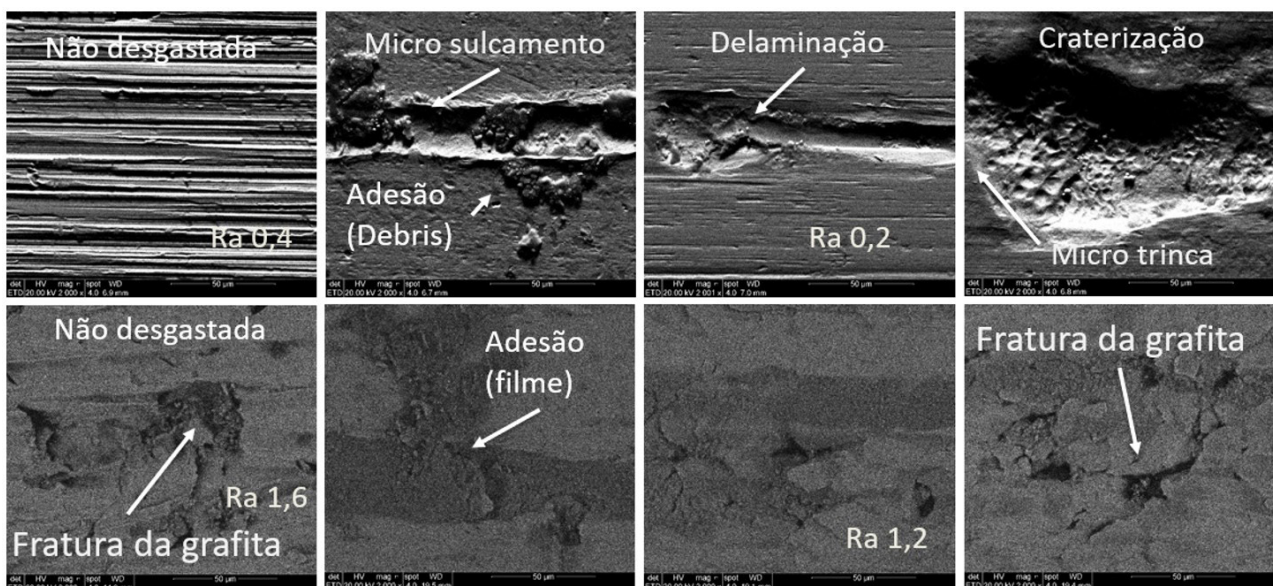


Figura 5. Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do Pino SAE 1045 e Bucha DIN GG20 após ensaio.

imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície dos pinos. Além do polimento, observam-se partículas aderidas, crateras, sulcos e riscos em todas as amostras.

As extremidades afiadas das partículas desgastadas na superfície podem caracterizar o desgaste abrasivo, evidenciado pelos sulcos orientados na direção do deslizamento.

Além disso, sabe-se que o *debris* gerado sofre um contínuo endurecimento, conforme identificado na Figura 5, por meio do encruamento, até que ocorra o processo de riscamento [20]. A formação de crateras pode estar associada a um deslocamento resultante da interação entre fadiga superficial e adesão [21].

Em relação ao DIN GG20, nota-se o aparecimento de regiões escuras, associadas à menor perda de massa nos pinos, fenômeno semelhante ao reportado por outros autores [22]. A diminuição da perda por desgaste nesses casos ocorre porque o filme formado reduz a extensão e a gravidade do contato direto entre os metais. Contudo, observa-se a formação de crateras a partir da propagação de trincas que se iniciam nos flocos de grafita e se desenvolvem em fraturas [23].

4 Conclusões

A perda de massa observada está relacionada à diferença de dureza entre os materiais do par. Quanto maior a diferença

de dureza entre o pino e a bucha, maior é o desgaste da bucha e menor é a perda de massa no pino. Em relação à severidade do desgaste nas amostras, os coeficientes de desgaste k foram aproximadamente 10^{-6} para os pinos em SAE 1045 e 10^{-5} para as buchas em DIN GG20, o que está de acordo com as resistências ao desgaste esperadas para cada material.

Foram identificados indícios de diversos mecanismos de desgaste, incluindo adesão, fadiga superficial e abrasão. Nos pinos, a presença de arestas deformadas plasticamente, observadas nas proximidades de sulcos durante a análise por MEV, indica o funcionamento do micro-mecanismo de sulcamento (*micro-ploughing*). Nas buchas de DIN GG20, percebeu-se a formação de crateras a partir da propagação de trincas que se iniciam nos flocos de grafita e se desenvolvem em fraturas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES (PROEX 23038.000341/2019-71), Ministério da Educação/Brasil e CNPq, Órgãos de Ensino Superior e Ciência do Governo Brasileiro, Centro de Microscopia (LCMic) e Desenvolvimento Tecnológico. V.V. de Castro agradece a FAPERGS (Processo 22/2551-0001071-7) e C.F. Malfatti agradece ao CNPq (Processo: 313493/2023-5).

Referências

- 1 Grzesik W, Kiszka P, Kowalczyk D, Rech J, Claudin C. Machining of nodular cast iron (PF-NCI) using CBN tools. *Procedia CIRP*. 2012;1:483-487.
- 2 Norton RL. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. 2. ed. Porto Alegre: Bookman; 2004.
- 3 Stachowiak GW. Wear: materials mechanisms and practice. Chichester: John Wiley & Sons; 2005.
- 4 Holmberg K, Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*. 2017;5(3):263-284.
- 5 Benincá B, Gasparin AL. Dispositivo gerador de desgaste, sistema e processo de geração de desgaste e medição de atrito. BR Patent 10 2019 006518 4 A2. 2019 Mar 29.
- 6 Benincá E, Tribômetro para avaliação de desgaste em sistema Bucha-Pino. Caxias dos Sul: IFRS; 2019.
- 7 Hibbeler RC. Engineering mechanics: combined statics & dynamics. 12th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall; 2009.
- 8 Castro VV, Fontoura LAM, Benfica JD, Seferin M, Pacheco JL, Santos CA. Lubricated sliding wear of SAE 1045 and SAE 52100 steel against alumina in the presence of biodiesel, diesel and a 50:50 blend of those fuels. *Wear*. 2016;368-369:267-277.
- 9 American Society for Testing and Materials. Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron castings. West Conshohocken: ASTM; 2019.
- 10 Avcı A, İlkaya N, Simsir M, Akdemir A. Mechanical and microstructural properties of low-carbon steel-plate-reinforced gray cast iron. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(3):1410-1416.
- 11 Weitao S, Bin W, Xiaoliang L, Yuqian W, Jian Z. Controlling the tribology performance of gray cast iron by tailoring the microstructure. *Tribology International*. 2022;167:107343.

- 12 Polat Ş, Atapek ŞH, Türedi E, Taşlıçukur Z, Altuğ GS. Investigation of dry sliding wear mechanism of GG20 and GG25 cast iron materials used for valves. In: Proceedings of the 3rd International Conference of Engineering Against Failure, ICEAF III; 2013; Kos-Greece. Bradford: Emerald; 2013.
- 13 Castro VV, Fontoura LAM, Benfica JD, Seferin M, Pacheco OL, Santos CA. Lubricated sliding wear of SAE 1045 and SAE 52100 steel against alumina in the presence of biodiesel, diesel and a 50:50 blend of those fuels. *Wear*. 2016;368-369:267-277.
- 14 Zambrano OA, Muñoz EC, Rodríguez SA, Coronado JJ. Running-in period for the abrasive wear of austenitic steels. *Wear*. 2020;15:203298.
- 15 Zambrano O, Munoz E, Rodríguez S, Coronado J. Running-in period for the abrasive wear of austenitic steels. *Wear*. 2020;452-453:203298.
- 16 Pantaleón E, Tanaka DK, Bernardes F. Análise das variações do coeficiente de atrito e as correlações com os mecanismos de desgaste. *Holos*. 2012;1:62-72.
- 17 Ghasemi R, Elmquist L. Cast iron and the self-lubricating behaviour of graphite under abrasive wear conditions. In: Proceedings of the 10th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron, SPCI 10; 2014; Mar del Plata, Argentina. Buenos Aires: Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales; 2014.
- 18 Gong W, Chen Y, Li M, Kang R. Coupling fractal model for adhesive and three-body abrasive wear of AISI 1045 carbon steel spool valves. *Wear*. 2019;418-419:75-85.
- 19 Aguilera-Gomez E, Plascencia-Mora H, Saldaña-Robles A, Ledesma OE, Alcantar VA. Análisis teórico-numérico de esfuerzos generados para bruñido de bola sobre cilindros rotativos. In: XX Congreso Internacional Anual de la SOMIM; 2014; Santiago de Querétaro, Mexico. Mexico: Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica; 2014.
- 20 Descartes S, Desrayaud C, Niccolini E, Berthier Y. Presence and role of the third body in a wheel-rail contact. *Wear*. 2005;258(7-8):1081-1090.
- 21 Gong W, Chen Y, Li M, Kang R. Adhesion-fatigue dual mode wear model for fractal surfaces in AISI 1045 cylinder-plane contact pairs. *Wear*. 2019;430-431:327-339.
- 22 Prasad B. Sliding wear response of a grey cast iron: effect of some experimental parameters. *Tribology International*. 2011;44(5):660-667.
- 23 Riahi A, Alpas A. Wear map for grey cast iron. *Wear*. 2003;255(1-6):401-409.

Recebido em: 22 Out. 2024

Aceito em: 16 Jan. 2025

Editor responsável:

Sabrina Arcaro 